



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9798>

#### **To cite this version :**

Shirin MIRDAMADI, Jean-Yves DANTAN, Ali SIADAT, Lionel ROUCOULES, Lionel MARTIN -  
L'OUTIL D'ANALYSE DE LA CAUSALITE, DES DEFAILLANCES, ET LEURS EFFETS (ACDE) -  
In: MOSIM 2014, France, 2014-11-05 - MOSIM 2014 - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



## L'OUTIL D'ANALYSE DE LA CAUSALITE, DES DEFAILLANCES, ET LEURS EFFETS (ACDE)

S. MIRDAMADI, J.Y. DANTAN, A. SIADAT

Arts et Métiers ParisTech, CER de Metz, LCFC,  
Laboratoire de Conception, Fabrication Commande  
shirin.mirdamadi@ensam.eu, jean-  
yves.dantan@ensam.eu

L. ROUCOULES, L. MARTIN

Arts et Métiers, CER d'Aix-en-Provence, LSIS,  
Laboratoire des Sciences de l'Information et des  
Systèmes

**RESUME :** Dans le contexte économique et compétitif actuel, les approches d'ingénierie intégrée ont apparu pour une meilleure gestion et organisation du cycle de vie des produits. Dans ce contexte la prise en compte des variabilités et leurs interdépendances a été démontré comme étant indispensable à l'amélioration de performance (coût, risque, qualité, ...). Bien que l'amélioration de la conception, et la maîtrise de leurs variations soient souvent au cœur de ces travaux de recherche, il est impératif de poursuivre l'effet de ces variations redoutées au cours de la production. Pour cela le meilleur moyen reste l'inspection, par le contrôle de conformité du produit, et le suivi du processus de fabrication. Pour l'élaboration d'un plan d'inspection optimal, un cadre méthodologique est proposé qui permet une prise de décision opérationnelle par l'intervention des outils opérationnels et assure la satisfaction des objectifs stratégiques (réduction des coûts, amélioration de la qualité, augmentation de la productivité, ...). Première activité de ce cadre est l'identification des caractéristiques clés à contrôler/suivre. Pour intégrer cette activité, les outils AMDEC, KC flowdown, sont retenus suite à une synthèse approfondie de la littérature. Cependant ces outils représentent certains manques à compenser et font l'objet de certaines modifications (adaptations) pour convenir au mieux aux besoins de cadre méthodologique proposé. L'intégration d'AMDEC et de KC flowdown aboutit à un nouvel outil présenté en détail nommé ACDE (Analyse de la Causalité, des Défaillance, et leurs Effets) dans le cadre de la planification d'inspection « au juste nécessaire ».

**MOTS-CLES :** plan d'inspection, suivi de fabrication, contrôle de conformité, caractéristiques clés, AMDEC, KC flowdown.

### 1 INTRODUCTION

Le contexte économique et compétitif actuel qui touche les entreprises, ne laisse pas indifférent les concepteurs. Les années 50 ont été marquées par une prise de conscience de ceux-ci de l'impact des décisions prises en amont du cycle de développement d'un système, sur des activités en aval du processus de développement. Ce qui a donné naissance au départ à des techniques de l'intégration de retour d'expérience dans le cycle de développement du produit et de son processus de fabrication dans l'objectif de l'amélioration continue. La prochaine étape était de passer d'une conception séquentielle enrichie par un retour d'expérience, à une conception intégrée et à des approches de conception pour X (DFX ou Design For X), qui contribuait à la satisfaction des objectifs stratégiques auxquels un système doit répondre : qualité, coût, délai. D'autant plus que les avancés technologiques permettaient d'envisager ce passage. Ce qui permet cette intégration, est avant tout le fait que les étapes de la conception partagent les mêmes objectifs (et contraintes) fondamentaux : réduction des coûts, diminution des risques, amélioration de la qualité, de la productivité, et de la satisfaction de client .... La deuxième raison est l'interdépendance des caractéristiques (l'ensemble des tolérances géométriques, des spécifica-

tions des composants, et des exigences fonctionnelles ou non-fonctionnelles du produit, ainsi que les paramètres opératoires du processus de fabrication) et due leurs variations.

Les travaux de recherche dans ce contexte, ont mis en avant de multiples niveaux d'intégration, notamment la conception intégrée du produit et du processus de fabrication (Matousek 1957) (Everhart 1960) (Bassetto 2005) (Etienne 2007) (Hassan 2010) (El Gueder 2012). Cependant bien que l'amélioration de la conception du produit, de son processus de fabrication, et la maîtrise de leurs variations soient souvent au cœur de ces travaux de recherche, il est impératif de poursuivre l'effet de ces variations redoutées au cours de la production et sur le produit et ces exigences. Pour cela le meilleur moyen reste l'inspection par le biais des mesures. Elle comprend la vérification de la conformité du produit et de ses composants au regard du cahier des charges, le contrôle de conformité, et la vérification de ce qui peut engendrer ces variations, c'est-à-dire le processus de fabrication, le suivi de fabrication.

Nous proposons par ce travail la mise en relation de ces deux derniers pour un plan d'inspection *multi-niveaux* optimal vus les objectifs fondamentaux de tout système abordés précédemment. Cette co-conception partage donc les mêmes motivations que toutes démarches de la conception intégrée : la causalité des caractéristiques.

L'intégration de la conception du produit, du processus de fabrication, et du processus d'inspection, qui se positionne traditionnellement avant la phase de production, est donc envisageable. Cependant nous considérons que la co-conception de produit-processus-inspection passe avant tout par une identification des besoins d'intégration. Vue les attentes de chaque étape de la conception, une façon d'y parvenir peut être une identification des besoins au fur et à mesure qu'on avance (ou plutôt qu'on recule) de l'industrialisation vers la conception du processus de fabrication et enfin celle du produit. Le travail présent se positionne désormais au premier niveau où la conception du produit et celle du processus de fabrication sont considérées comme des données d'entrée, et le plan d'inspection est attendu.

## 2 CADRE D'UNE METHODOLOGIE POUR LA GENERATION D'UN PLAN D'INSPECTION

La génération d'un plan d'inspection ne peut être efficace que si elle est menée d'une façon structurée par un cadre de prise de décision enrichie par la connaissance et expertise métier formalisée au sein de ce dernier. Dans un monde complexe une prise de décision opérationnelle doit tenir compte des objectifs multiples et souvent interdépendants. La finalité de celle-ci dépend fortement de la définition des critères stratégiques qui pilotent la prise de décision. Un cadre méthodologique est donc proposé qui se décompose en quatre sous-activités : (A00) identifier les critères pondérés de la prise de décision, (A01) identifier les caractéristiques clés liées au produit/processus à contrôler/suivre, (A02) identifier le mode/moyen d'inspection, et (A03) identifier les points d'insertion des activités d'inspection. Les critères identifiés pour une prise de décision *multicritère* sont « La satisfaction de client », « La difficulté de réalisation » et « Le coût ». Chacune de ces sous-activités sont modélisée sous IDEF0 (figure 1) afin de formaliser leurs éléments d'entrée, et de contraintes sous forme de contrôle, et les ressources nécessaires comme support de l'exécution de chaque activité.

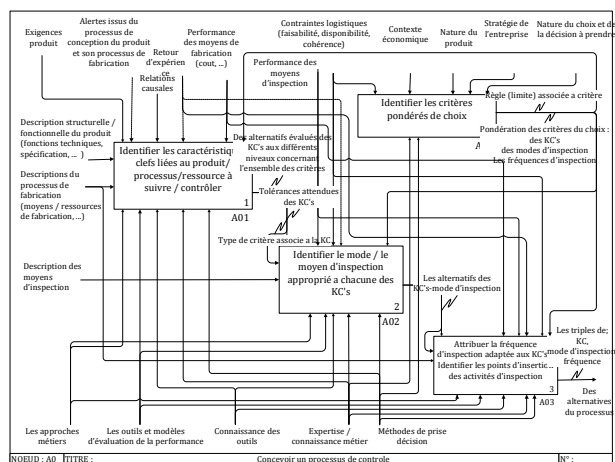


Figure 1 : Les sous-activités de la prise de décision sous le formalisme IDEF0

### 2.1 Démarche décisionnelle outillée

Ces ressources sont principalement les outils, modèles, et méthodes opérationnels qui intègrent le processus décisionnel. Ils sont dotés de certaines particularités. Ils doivent :

- prendre en compte des critères souhaités,
- traiter le même flux d'information que chaque sous-activité,
- et avoir les mêmes finalités que chacune des sous-activités.

Vue la multitude de ces derniers dans la littérature, une analyse critique a été effectuée afin d'en retenir les plus aptes qui s'ajuste au mieux au processus décisionnel. Nous nous focalisons par ce travail sur la première activité, identification des caractéristiques clés (KC), supposée être la plus subjective des trois vu la nature de ses critères, la satisfaction du client, et la difficulté de réalisation.

A l'issue de cette analyse deux outils sont retenus bien qu'ils représentent des inconvénients, AMDEC et KC flowdown.

L'AMDEC se démarque des autres outils pour multiples raisons. Premièrement il offre une structure adaptée et une capacité à réaliser une agrégation de plusieurs critères pour une prise de décision multicritères. Deuxièmement la « non-précision » des estimations peut être bénéfique puisqu'on se situe qu'à la première activité de la prise de décision. Autrement dit l'estimation qualitative est suffisante à ce stade. Les estimations numériques viendront par la suite lors que la décision se montre moins subjective. Troisième, comme nous parlons de plan d'inspection exigeant plus de vigilance, une vision pessimiste comme celle d'AMDEC semble plus adaptée. Egalement il est considéré comme un outil rependu dans les industries, facile à mettre en œuvre et flexible à tout contexte.

Egalement cette analyse montre que la majorité des outils ou méthodes sont pertinentes pour soit la planification de contrôle de conformité (évaluation de la performance au niveau du produit ou de la pièce) soit la planification de la surveillance (évaluation de la performance au niveau du processus), mis à part KC Flowdown. Cet outil peut fournir une vision globale du problème afin d'envisager une Co-conception de plan de contrôle de conformité du produit et de suivi de fabrication du processus. La prise en compte de ces corrélations dans la démarche de décision part de l'hypothèse de départ : la possibilité d'avoir de l'inspection aux niveaux produit, pièce, processus, ressource, ...

Les outils retenus ont leurs propres objectifs pour lesquels ils sont le plus souvent sollicités : AMDEC, identifier des risques les plus élevés du système pour la proposition des actions correctives, et KC Flowdown, fournir une vision globale sur l'interdépendance des variations, et la propagation des risques. La nécessité d'une prise de décision multicritères motive le choix d'AMDEC, tandis que la nécessité d'une évaluation multi-niveaux nous incite à choisir le KC Flowdown. Ainsi l'usage commun d'AMDEC et la structure arborescente de KC Flowdown

rendent ces outils, facile à percevoir. Néanmoins il est à noter que, contrairement à l'usage habituel des outils, le contexte dans lequel nous positionnons cette étude, est la planification d'inspection à travers un processus de prise de décision. Cela démontre la nécessité d'apporter certaines modifications à ces outils et les adapter au contexte de ce travail. La section suivante présente l'outil proposé d'analyse de la causalité, des défaillances, et leurs effets pour identification des KCs.

### 3 ANALYSE DE LA CAUSALITE, DES DEFAILLANCES, ET LEURS EFFETS (ACDE)

Cette section est consacrée à l'illustration de la structure de l'outil proposé nommé « Analyse de la Causalité, des Défaillances, et leurs Effets (ACDE) ».

#### 3.1 Illustration de la structure proposée

Nous détaillons à présent la grille d'ACDE.

##### 3.1.1 Détails de la grille

Le tableau 1 présente le tableau d'analyse du produit.

I.1. Fonction de produit : Avant tous, en première colonne, les fonctions associées au produit au niveau de l'assemblage sont identifiées. Elles peuvent être issues d'une analyse fonctionnelle. A savoir que quelque soit le niveau, produit ou pièce, pour une meilleure analyse fonctionnelle nous pouvons différencier certains type de fonction : une fonctionnalité du système attendue par le client, une fonction garantie par une « condition d'aptitude à l'emploi », et une condition d'assemblage. Ceci peut être la traduction de la colonne de l'Effet de l'AMDEC produit classique (conséquence client). Dans le contexte d'identification des KCs pour la planification d'inspection, les fonctions identifiées sont susceptibles d'être soumises aux mesures d'inspection, suite à une hiérarchisation de leurs niveaux de criticité, et donc soumise à la hiérarchisation des risques. Il est donc nécessaire d'évoquer leurs critères d'acceptation.

	Fonction- Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Pourquoi		Comment				Gravité	Difficulté de réalisation
			Fonction	Est impacté	Fonction- Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution		
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Tech- nique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Im- pact	Gravité de fonction	Difficul- té de réalisa- tion de fonction

Tableau 1 : ADCE, tableau d'analyse du produit

I.2. Exigences et critères d'inspection : La deuxième colonne de tableau d'ACDE au niveau d'analyse du produit, met en avant les exigences et les critères quantitatifs d'acceptation. Ainsi il est clair que l'analyse de la criticité au niveau du produit se limite aux exigences et

caractéristiques mesurables. A noter que multiples critères d'acceptation peuvent être associés à chaque fonction identifiée en première colonne. A ce niveau, le critère d'acceptation, décrit par TAFT pourrait être transmis. Ces critères d'acceptation assurent certes la fonctionnalité du produit mais aussi confirme la faisabilité de l'inspection au niveau du produit.

I.3. Fonction/Pourquoi : La troisième colonne consiste d'une manière générale à répondre aux questions suivantes pour chaque fonction identifiée en première colonne : Pourquoi la satisfaction de la fonction est-elle importante (A quoi contribue-t-elle la fonction) ? A quel point contribue-t-elle ? Au niveau d'analyse du produit par ACDE, il n'y pas de fonction de plus haut niveau. Cette colonne est donc à ne pas remplir pour l'analyse du produit.

I.4. Fonction Technique Elémentaire : La quatrième colonne a pour but d'identifier les fonctions techniques élémentaires (FTE) de l'ensemble des composants du produit. C'est-à-dire qu'elle répond à la question suivante : Comment les fonctions du produit sont-elles assurées ? Cela rappelle la colonne des causes en AMDEC classique. Cette colonne d'ACDE est constituée de la description textuelle (et non les limites mesurables et quantifiables comme en deuxième colonne), des FTEs. Elles sont soit associées à la fois à deux ou plusieurs composants du produit (comportement pièce-pièce), soit intrinsèques à un seul composant. Chaque fonction du produit peut être attachée à plusieurs FTEs. Nous souhaitons également savoir à quel point chacune de ces FTEs contribuent à la satisfaction des fonctions du produit. Une colonne est alors consacrée à l'estimation de ces impacts.

I.5. Spécification fonctionnelle : La cinquième colonne applique un autre niveau de décomposition de l'analyse du produit. A partir de chaque description qualitative de cause en quatrième colonne, les critères quantitatifs d'acceptation doivent être identifiés. Attaché à chaque FTE relative à certains composants, il existe de multiples spécifications ou caractéristiques associées aux composants. En effet les ces spécifications des pièces impactent les fonctions du produit à travers la réalisation des FTEs. Ceci est traité par TAFT à travers la colonne de « Spécifications des surfaces ». Une colonne est enfin consacrée à l'estimation de l'impact de chacune de ces spécifications sur la FTE relative. Une priorisation de l'importance des caractéristiques peut également suffire.

I.6. Gravité de la fonction : En sixième colonne la gravité de chaque fonction du produit identifiée en première colonne doit être exprimée par les experts en répondant à une question : a quel point est-il important de satisfaire une fonction ? Cette estimation peut être issue du tableau de hiérarchisation des fonctions attribué par l'analyse fonctionnelle. A noter qu'en AMDEC produit classique, la gravité est estimée associée à chaque cause alors qu'en ACDE, elle est estimée chaque fonction du produit.

I.7. Difficulté de réalisation de la fonction : En septième et dernière colonne, la difficulté de réalisation de chaque fonction du produit doit être estimée en répondant à la question suivante : a quel point est-il difficile de réaliser

une fonction ? Nous pouvons dire que ce facteur de risque, et le facteur de fréquence d'apparition de défaillance proposé par AMDEC, ont une relation inverse tandis qu'ils ont la même origine, la capabilité du processus.

Le tableau 2 présente le tableau d'analyse des composants.

**II.1. Fonction Technique Élémentaire :** La première colonne réunie les FTEs. Elles peuvent être issues de l'analyse fonctionnelle de chacune des pièces composant le produit. A noter qu'une analyse exhaustive des pièces nécessite un nombre de tableaux d'ACDE équivalent au nombre de pièces.

	Fonction- Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Pourquoi		Comment				Gravité	Difficulté de réalisation
			Fonction	Est impacté	Fonction- Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution		
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficulté de réalisation de FTE

Tableau 2 : ADCE, tableau d'analyse des composants

**II.2. Exigences et critères d'inspection :** Les critères de mesure associés à chaque FTE et inhérent à la pièce actuellement analysée doivent être exprimés. Ces critères sont les spécifications et leurs limites indiquées par la conception. Comme précédemment pour l'analyse du produit ces critères démontrent que les FTEs sont mesurable d'une manière objective.

**II.3. Fonction de produit :** La troisième colonne est consacrée à l'identification des fonctions du produit dont la satisfaction dépend des FTEs identifiées en première colonne. Il est clair que multiples fonctions du produit (conséquences) peuvent être associées à chaque FTE. Par ailleurs une fonction du produit peut être commune à plusieurs FTEs. Nous souhaiterons estimer également le niveau de contribution des FTEs sur les fonctions du produit.

**II.4. Opération :** La quatrième colonne a pour but de discerner les opérations du processus de fabrication de chaque pièce et de les associer aux FTEs contribuées par celles-ci. La description des opérations sont considérées comme des causes qualitatives des FTEs. Elles assurent l'aboutissement des fonctions techniques élémentaires (par le biais des spécifications identifiées en deuxième colonne). Pour mieux identifier ces dernières il serait judicieux de s'appuyer sur la gamme de fabrication, les contrats de phase de chaque pièce, et les spécifications à réaliser. Les experts sont menés à estimer également le niveau d'impact des opérations sur les FTEs. A noter que chaque opération peut correspondre à plusieurs spécifications au sein d'une même FTE. L'estimation de la con-

tribution d'une opération donnée est donc différente selon la spécification concernée.

**I.5. Paramètre de processus :** La cinquième colonne du tableau d'analyse des composants identifie les paramètres (multiple ou pas) du processus associés à chaque opération. Les paramètres de processus et leurs limites définies sont considérés comme des causes quantitatives pour la réalisation des FTEs. L'identification de ceux-ci peut s'inspirer de la gamme détaillée de fabrication.

**I.6. Gravité de FTE :** La note de gravité de chaque fonction technique élémentaire doit être attribuée en sixième colonne.

**I.7. Difficulté de réalisation de FTE :** En dernière colonne le niveau de la difficulté de réalisation des fonctions techniques élémentaires doit être estimé.

Le tableau 3 présente le tableau d'analyse du processus.

	Fonction- Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Pourquoi		Comment				Gravité	Difficulté de réalisation
			Fonction	Est impacté	Fonction- Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution		
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
III. Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	FTE	Est impacté de	Comment	Impact	Comment « quantitatif »	Impact	Gravité d'opération	Difficulté de réalisation d'opération

Tableau 3 : ADCE, tableau d'analyse du processus

**III.1. Opération de processus :** La première colonne de tableau d'analyse du processus décrit les opérations de fabrication destinées à la réalisation des pièces. Ces opérations sont extraites de la gamme détaillée de fabrication. Il existe donc un tableau d'analyse du processus associé à chaque pièce.

**III.2. Paramètres de processus et critère d'inspection :** Les critères de mesure associés à chaque opération sont à identifier en deuxième colonne. Ils sont les critères qui rendent les opérations mesurables d'une manière objective et dont l'évolution impacte l'efficacité des opérations.

**III.3. Fonction Technique Élémentaire :** La troisième colonne de tableau d'analyse du processus réunit les FTEs, considérées comme des conséquences des opérations effectuées pour la réalisation des pièces à travers les spécifications. Une autre question qui doit être posée est de savoir à quel point, les FTEs sont-elles influencées par chacune des opérations.

**III.4. Fonction-Opération/Comment :** La quatrième colonne de ce tableau a pour but de déterminer le « comment » qualitatif des opérations, c'est-à-dire les moyens qui assurent la réalisation des opérations. Nous considérons que dans le contexte de planification d'inspection où nous nous interrogeons sur la criticité des caractéristiques à contrôler, cette colonne n'inspire plus beaucoup au niveau de l'analyse du processus. Autrement dit après avoir exploitées les opérations de la

gamme dont les ressources de fabrication sont connues, nous pouvons juger que l'analyse de la criticité n'a plus d'intérêt d'un point de vue planification d'inspection.

III.5. Critère d'acceptation « quantitatif » : Idem pour la cinquième colonne les causes quantifiables qui devraient contribuer au bon déroulement d'une opération n'apparaissent plus au niveau d'analyse du processus.

III.6. Gravité d'opération : La note de gravité, un des deux facteurs de risque, des opérations de fabrication doit être estimée.

III.7. Difficulté de réalisation d'opération : Le niveau de la difficulté de réalisation des opérations du processus de fabrication est estimé en septième colonne.

Nous pouvons remarquer que les trois grilles d'analyse du produit, de ses composants, et du processus partagent des données communes. Ce qui est également le cas d'AMDEC classique par ses multiples niveaux où ces données sont identifiées et ré-identifiées à chaque niveau d'analyse, et les facteurs de risque sont estimés et ré-estimés. Cependant l'exploitation simultanée des liens de causalité avec la mise en œuvre des trois tableaux d'analyse peut empêcher la perte et la ré-identification des données, et donc la ré-estimation des facteurs de risque, la gravité et la difficulté de réalisation. La section suivante détaille des relations causales entre les trois grilles précédemment décrites.

### 3.1.2 Détails des relations entre grilles

Ces liens sont décrits ci-dessous et sont catégorisés par leurs finalités : tracer les causalités, propager les facteurs de risque (la gravité, propager la difficulté de réalisation). Elles sont illustrées en tableaux 4 et 5.

#### 3.1.2.1 La causalité

Lien de transfert de fonction, A : Comme décrit précédemment les fonctions du produit sont identifiées en première colonne du tableau d'analyse du produit mais aussi en troisième colonne de la grille d'analyse des composants en tant que les conséquences des FTEs. Comme illustré en figure 4, cette ré-identification peut être remplacée par un transfert de celles-ci du niveau de l'analyse du produit à l'analyse des composants (d'une manière descendante).

Liens de transfert sélectif de FTE et de leurs impacts, B, D : Les FTEs sont identifiées en quatrième colonne du tableau d'analyse du produit ainsi qu'en première colonne de l'analyse des composants. Pour éviter la perte de donnée et garder une certaine cohérence les FTEs, « Comment », sont à transférer de l'analyse du produit à l'analyse des composants (tableau 4). De même leurs niveaux d'impact sur les conséquences sont transmis en troisième colonne de l'analyse des composants où les fonctions du produit apparaissent (tableau 4). Ces niveaux d'impact sont en effet des facteurs de propagation détaillés ultérieurement qui permettent la propagation des facteurs de risque, au lieu de ré-estimation de ceux-ci à chaque niveau d'analyse. Ces

liens ne font pas qu'un simple transfert. Ils trient également les FTEs qui correspondent à chaque tableau d'analyse des composants. A savoir qu'à ce niveau, il existe des tableaux au nombre des composants. Les FTEs inhérentes à toutes les pièces seront réparties sur plusieurs tableaux d'ACDE du niveau de l'analyse des composants.

			Pourquoi		Comment					
	Fonction- Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté	Fonction- Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution	Gravité	Difficulté de réalisation
Niveau	1	2	3		4		5		6	7
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Elémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact	Gravité de fonction	Difficul- té de réalisa- tion de fonction
	A				B		C			
II. Pièce	Fonction Technique Elémentaire	Spécification fonction- nelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact	Gravité de FTE	Difficul- té de réalisa- tion de FTE

Tableau 4 : La structure d'ADCE et les liens de causalité

Lien de transfert sélectif et de priorisation de spécification fonctionnelle, C : Les spécifications fonctionnelles identifiées en cinquième colonne du tableau de l'analyse du produit, apparaissent également en deuxième colonne du tableau d'analyse des composants. Il est proposé donc de les transférer en tant que les critères d'inspection des caractéristiques quantifiables (tableau 4). A noter que dans le contexte de planification d'inspection et d'identification des KCs, selon la stratégie de l'entreprise, les caractéristiques quantifiables peuvent être transférées qu'en partie. C'est-à-dire que d'un point de vue économique, il est peut être judicieux de transmettre que des caractéristiques les plus pertinentes pour faire l'objet de mesure. Cela passe par une priorisation de celles-ci grâce aux impacts estimés en cinquième colonne de l'analyse du produit. Elles seront donc considérées comme pertinentes et transférées si :

- Soit la gravité de la fonction concernée du produit est élevée,
- Ou bien, soit l'impact des critères d'acceptation sur la fonctionnalité est élevé, malgré une gravité faible associée à la fonction.

#### 3.1.2.2 La propagation

Liens de propagation de la gravité, E, F : Lors de l'analyse du produit les gravités des fonctions du produit sont estimées en sixième colonne. En même temps les liens de causalité entre les fonctions du produit et les

FTEs, et leurs niveaux de contributions sont identifiés au même niveau en quatrième colonne. Grâce à ces informations déjà extraites, nous proposons la propagation (et non ré-estimation) de la gravité au niveau de l'analyse des composants pour maintenir la cohérence entre les estimations de gravité dans l'ensemble des niveaux d'ACDE. La propagation descendante de la gravité est proposée puisqu'il est plus facile de juger la gravité des fonctions du produit que celle des FTEs ou encore des caractéristiques de plus bas niveau. Comme toute propagation, mis à part l'objet de la propagation, la gravité, un facteur de propagation est nécessaire, le niveau d'impact de FTE sur la fonction du produit (tableau 5).

	Pourquoi		Comment				Gravité	Difficulté de réalisation
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution
Niveau	1	2	3	4	5	6	7	
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Élémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact
II. Pièce	Fonction Technique Élémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact
III. Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	FTE	Est impacté de	Comment	Impact	« Comment » quantitatif	Impact

Tableau 5 : La structure d'ADCE et les liens de propagation

Liens de propagation de la difficulté de réalisation, G, H : Idem pour le facteur de risque de difficulté de réalisation à une différence près : il est préférable de mener la propagation de ce facteur de risque d'une manière ascendante. La difficulté de réalisation est généralement la traduction de niveau de la capacité du processus (il est directement lié à la fréquence d'apparition des défaillances). Il est alors plus judicieux de procéder à l'estimation de ceci en partant du niveau (le plus proche) de l'analyse de processus. Dans ce cas ce qui nous permet de propager la difficulté de réalisation de l'analyse des composants à l'analyse du produit est toujours le niveau d'impact de FTE sur la fonction du produit. Ce facteur de propagation apparaît en troisième colonne du tableau de l'analyse des composants (tableau 5).

La logique des interdépendances entre les tableaux d'ACDE et les liens de causalité existants entre les caractéristiques du produit et de ses composants décrits ci-dessus, sont également valable entre les niveaux de l'analyse des composants et l'analyse du processus. Le

tableau 6 représente une vision globale sur l'ensemble des niveaux d'ACDE et ses « cross-links ». Ils sont de cinq différentes natures en fonction de leurs objectifs et les actions qu'ils déclenchent.

Jusqu'ici une vue statique de ceux-ci a été proposée. La section qui suit permet une description dynamique d'ACDE par le processus de déploiement de l'outil et par les grilles de notation et de propagation.

	Pourquoi		Comment				Gravité	Difficulté de réalisation
	Fonction-Opération	Critère d'acceptation « quantitatif »	Fonction	Est impacté de	Fonction-Opération	Contribution	Critère d'acceptation « quantitatif »	Contribution
Niveau	1	2	3	4	5	6	7	
I. Produit	Fonction de produit	Exigence + Critère d'inspection	Pourquoi	Est impacté de	Fonction Technique Élémentaire	Impact	Spécification fonctionnelle	Impact
II. Pièce	Fonction Technique Élémentaire	Spécification fonctionnelle + Critère d'inspection	Fonction de produit	Est impacté de	Opération	Impact	Paramètre de processus	Impact
III. Processus	Opération de processus	Paramètre de processus + Critère d'inspection	FTE	Est impacté de	Comment	Impact	« Comment » quantitatif	Impact

Transfer — Transfer sélectif — Transfer sélectif / Priorisation —  
 Facteur de propagation — Objet de propagation ....

Tableau 6 : La structure globale d'ADCE

### 3.2 Processus de déploiement de l'outil

Le déploiement se décline selon trois axes : l'analyse du produit, l'analyse des composants, l'analyse du processus.

En première étape l'analyse du produit débute par l'identification des fonctions du produit et poursuit indépendamment d'autres niveaux d'analyse jusqu'à l'identification des spécifications fonctionnelles, en passant par l'identification des FTEs et la détermination de leurs contributions sur les fonctions du produit. Il est ensuite suivi par l'estimation de la gravité des fonctions du produit.

La deuxième étape consiste à transmettre les caractéristiques par des liens de causalité de l'analyse du produit à l'analyse des composants. Nous procédons également à cette étape toutes les informations nécessaires à la propagation de la gravité des fonctions du produit aux FTEs des composants.

La troisième étape poursuit l'analyse par la transmission des caractéristiques au niveau du processus par des liens de causalité et par la propagation de la gravité des FTEs à la gravité des opérations du processus. Puisque à ce

stade d'analyse, les opérations du processus sont identifiées, la difficulté de réalisation de chacune doit être estimée.

En quatrième et cinquième étapes, l'analyse multi-niveaux est accomplie par une propagation de la difficulté de réalisation du niveau du processus à celui des composants et ensuite au niveau du produit.

Malgré de multiples possibilités de l'extraction de connaissances des experts, nous avons fait le choix de baser toutes les estimations de risque sur une échelle ordinale pour des raisons de simplicité et de clarté, lors de l'application des heuristiques de propagation des facteurs de risque. Il est rare de disposer l'ensemble des informations nécessaires à l'estimation du risque et leur relation mathématique pour la propagation des risques suffisamment précises. Toutes ces heuristiques, règles, ou indications de déploiement d'ACDE sont discutés par la section suivante.

### 3.3 Grilles de notation et de propagation

Pour orienter les évaluations qualitatives des risques, il est recommandé de définir la grille d'évaluation adaptée au contexte de l'industrie (industrie automobile ...) ou le type de produit. Définir une grille idéale utilisable dans tous les secteurs semble impossible. Nous proposons ainsi certaines grilles d'estimation, adaptées à la structure et les objectifs de l'outil proposé. Ces estimations se portent sur quatre axes principales : les grilles d'évaluation des causalités, grille d'évaluation de la gravité, grille d'évaluation de la difficulté de réalisation, et les grilles de propagation. Les tableaux sont inspirés de différentes grilles (PSA, RENAULT, QS 9000, VDA, ...) proposées et analysées quant à leurs avantages et inconvénient par (Ozouf 2009).

Les grilles d'évaluation des causalités ont pour but de faciliter et de mieux cadrer l'identification des liens de causalité et l'expression de l'importance de leur implication. Premièrement en colonne quatre la contribution des FTEs ou des opérations de sur les fonctions du produits ou les FTEs est estimée en utilisant une échelle ordinale de 1-10. Il s'agit de répondre à la question suivante : A quel point la fonction du produit/FTE est influencée si la fonction de la pièce/l'efficacité de l'opération n'est pas acquise ? Le tableau 7 propose la traduction linguistique des notes de contribution.

Note de contribution	La perception linguistique de la contribution
1-2	Peu ou pas d'effets sur la fonctionnalité
3-4	Non-acquisition, pourrait induire une gêne pour la fonctionnalité
5-6	Non-acquisition, conduit parfois à une non-fonctionnalité
7-8	Non-acquisition, empêche la fonctionnalité
9-10	Non-acquisition, peut générer des problèmes de sécurité

Tableau 7 : La traduction linguistique de l'impact de FTE/opération sur la fonction du produit/FTE

D'autre évaluation de la causalité se fait en cinquième colonne des tableaux d'analyse. L'objectif est de pouvoir prioriser les caractéristiques mesurables par rapport à leur importance. Ces caractéristiques sont les spécifications des composants ou les paramètres du processus. Ce niveau d'impact ne joue pas le rôle d'un facteur de propagation (contrairement à ce qui est fait en quatrième colonne) mais permet de filtrer (si possible) le nombre de critères d'acceptation dans l'objectif de limiter les activités d'inspection. Selon la stratégie d'entreprise, certaines indications sous forme de tableau peuvent être définies pour rendre cette estimation plus cohérente. Nous proposons une grille en tableau 8.

Note de contribution	La perception linguistique de la contribution
1-2	Pas ou peu d'impact de spécification-paramètre élémentaires sur la réalisation de fonction-opération
3-4	Effet mineur sur la fonction-opération, détectable et évitables par l'opérateur, ne provoque qu'un léger inconfort
5-6	Défaillance ne survient qu'occasionnellement sur fonction-opération en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations
7-8	Pièces défectueuses fréquentes en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations
9-10	Pièces défectueuses en raison de la non-satisfaction des limites de spécification/non-efficacité des opérations génèrent probablement des problèmes de sécurité

Tableau 8 : Estimation de la contribution de Spécification-Paramètre "Comment quantitatif" sur Fonction-Opération "Comment"

La grille d'évaluation de la gravité facilite l'estimation de celle-ci qui se fait uniquement au niveau de l'analyse du produit. La question qui doit être posée est la suivant : A quel point il est crucial de réussir une fonction ? Par la grille proposée cette estimation se fait sur échelle ordinale. Le tableau 9 présente la grille de la gravité inspiré de (Ozouf 2009).

Note de gravité	La perception linguistique de la gravité
1-2	Aucun effet/le client ne perçoit pas
3-4	Une fonction esthétique ou de bruit, l'utilisateur peut continuer à utiliser le système
5-6	Fonction secondaire, malgré le défaut, l'utilisateur peut continuer à utiliser le système
7-8	La fonction principale, conduit à une panne qui demande une intervention pour rendre le système de nouveau utilisable
9-10	Fonction de sécurité, conduit à un risque de mort ou de blessures pour les usagers ...

Tableau 9 : Grille d'évaluation de la gravité

Le niveau de la difficulté de réalisation doit être exprimé également sur une échelle ordinale, mais contrairement à la gravité, elle est évaluée uniquement au niveau de l'analyse du processus. Cette estimation se fait toujours dans le but d'identifier les caractéristiques les plus critiques. Cette évaluation peut être basée sur le niveau de la capacité du processus tel qu'il est proposé en tableau 10. Etant donnée la multitude des indicateurs de



capabilité, un choix doit être fait pour proposer un indicateur qui reflète deux facettes, la décentration et de la dispersion, toutes les deux à l'origine des éventuelles défaillances. En outre, il semble rationnel de choisir un indicateur de capabilité à long terme plutôt que court terme. Une prise de décision basée sur des données court terme, peut mener à une intervention très régulière alors que celle-ci ne pourra pas de toute manière améliorer la qualité livrée à long terme. Il est aussi intéressant de prendre en compte le rapport entre les indicateurs court et long terme comme l'indicateur Rs (voir le chapitre 2). Cela donne une image de fréquence de défaillance ou répond à la question suivant « How often the process drifts ? ».

Note de la difficulté de réalisation	Capabilité
1-2	$Ppk > 2$
3-4	$1.5 < Ppk < 2$
5-6	$21 < Ppk < 1.5$
7-8	$0.5 < Ppk < 1$
9-10	$Ppk < 0.5$

Tableau 10 : Grille proposée d'estimation de la difficulté de réalisation au regard de la capabilité

Suite à la première estimation de la gravité au niveau du produit et celle de la difficulté de réalisation au niveau du processus elles doivent être propagées à d'autres niveaux. Pour cela et pour compléter l'analyse, les heuristiques et règles sont définies. Le tableau 11 résume les heuristiques proposées de propagation de gravité en sixième colonne. Comme décrit précédemment cette propagation dépend des liens de causalité et leur importance exprimés en quatrième colonne des tableaux d'analyse.

		Gravité des Fonction produit/FTEs					
		1	2	3-8			9-10
Contribution des FTEs/Operations (IV)	1-4	0	-1	-2	-2	-2	-1
	5-6	0	-1	-1	-1	-1	-1
	7-8	0	0	0	0	0	0
	9-10	0	0	0	0	0	0

Tableau 11 : Propagation de la gravité de la fonction, au regard des impacts associés

		Difficulté de réalisation des Operations/FTEs					
		1	2	3-8			9-10
Impact reçu par des FTEs/Fonction de produit (III)	1-4	0	-1	-2	-2	-2	-1
	5-6	0	-1	-1	-1	-1	-1
	7-8	0	-1	-1	-1	-1	-1
	9-10	0	0	0	0	0	0

Tableau 12 : Propagation de la difficulté de réalisation

De même, le tableau 12 propose les heuristiques de la propagation de difficulté de réalisation en septième colonne. Cette propagation ascendante se fait également en fonction des causalités exprimées en troisième colonne des tableaux d'ACDE et leur niveau d'importance.

Suite à la proposition des grilles de notation et de propagation qui permettent le « remplissage » des tableaux d'ACDE, la section suivante revoie l'outil d'AMDEC en vue de proposer une synthèse des modifications apportée ceux-ci par la proposition d'ACDE.

#### 4 SYNTHÈSE DES APPORTS D'ACDE

Pour faire face aux inconvénients d'AMDEC et de KC Flowdown, l'adaptation de l'outil a passé par :

- Les facteurs de risque à estimer :

Comme il a été indiqué en section 2, l'activité A01 vise uniquement à identifier les KCs au niveau du produit, de la pièce, ou de son processus de fabrication et à déterminer leurs criticités. Ce n'est que lors d'exécution des activités A02 et A03 que nous parlons d'inspection, de ses ressources, sa performance, ... Nous ne prenons pas en considération les moyens d'inspection disponibles, ni leurs niveau de précision, .... Ainsi, dans la première phase de la conception du processus d'inspection, il n'y a aucun intérêt à établir la cotation de la détection (difficulté de détection). Cette dernière doit être déterminée lors des activités A02 et A03 du processus décisionnel proposé. Une fois les KCs les plus pertinentes classées, elles indiquent la capacité requise des ressources d'inspection et la fréquence de contrôle de conformité/suivi de fabrication nécessaire.

D'autre part, en déterminant la fréquence d'apparition de défaillance par l'AMDEC classique, nous nous intéressons en effet à la capabilité des moyens de production, qui garantissent la qualité du produit, indirectement et d'une manière non-explicite. Donc, il serait judicieux de parler de niveau de la difficulté de réalisation associée à des caractéristiques au lieu de la fréquence de défaillance. Cela s'inspire de l'esprit préventif de l'inspection (plutôt que correction pour un AMDEC classique). Autrement dit la difficulté de réalisation a plus de sens d'un point de vue conception de plan d'inspection.

La gravité reste un facteur sur lequel la décision se fonde dans l'approche proposée. Cela peut paraître contradictoire puisque nous revendiquons une stratégie optimiste (contrairement à l'AMDEC classique) ou le terme importance aurait plus de sens que la gravité. On maintient donc la gravité comme un facteur de risque, celle de ne pas satisfaire une caractéristique ou fonction, qui évoque à la fois l'importance des caractéristiques.

A notre connaissance, la modification des facteurs de risque n'a jamais été proposée dans la littérature. Cela provient du fait que le but de ce travail (malgré certain point en commun) n'est pas celui de l'AMDEC classique. D'autant plus que nous avons décomposé la démarche en trois sous-activités différentes.

- La propagation des facteurs de risque :

L'exactitude et la précision des informations exprimées par les experts dépendent de leurs implications, de l'accessibilité de l'information, ... mais sont toujours associées à l'incertitude. Pour surmonter ce problème, les estimations et les évaluations hasardeuses de risque doivent être réduites au minimum (Mili et al. 2009) Par l'AMDEC classique les experts sont généralement invités à (ré) estimer les facteurs de risque à chaque niveau. Cela peut conduire à certaines incohérences entre les estimations. Nous pensons que, pour maintenir l'homogénéité des estimations de risques, après une première et seule fois d'estimation à un niveau donné, ils doivent être propagés à d'autres niveaux. La gravité estimée d'un paramètre opératoire du processus ne peut pas être insensible à la gravité d'une fonction du produit qu'assure l'opération concernée. De même la difficulté de réalisation des opérations, connaissant leur impact significatif sur les fonctions, doit nous permettre de déterminer la difficulté de réalisation des fonctions du produit.

- L'estimation du risque global :

Pour la prise de décision, l'approche classique d'AMDEC détermine l'Indices de Priorité de Risque (IPR) global basé sur la multiplication de F, G et D qui sont estimés eux-mêmes par une échelle ordinale. Cela peut générer une valeur identique d'IPR, pour différents ensemble de F-G-D. Puisque la prise de décision par AMDEC concerne uniquement l'affectation (ou non) des actions correctives, cette note globale serait suffisante. Néanmoins chaque facteur de risque et sa note associée, déclencherait une décision différente en ce qui est la planification d'inspection. Ces facteurs de risque ne doivent pas donc être agrégés. Une gravité élevée d'une fonction au niveau du produit et une fréquence faible de fréquence n'exige pas la même action que le cas contraire, ou la fréquence élevée d'apparition de défaillance demande une vigilance au niveau du processus. Par conséquence, les caractéristiques ou les fonctions à haut risque ne seraient pas prises en considération. Le niveau de risque élevé de chacun de ces facteurs devrait totalement différencier la stratégie établie. (Sankar & Prabhu 2001), (Seyed-Hosseini et al. 2006), et (Chang et al. 2009) critiquent l'estimation globale conventionnelle du risque. D'après eux les éléments d'IPR ne sont pas pondérés de façon égale l'un par rapport à l'autre en termes de risque. En conséquence, certains scénarios de (F, G, D) aboutissent aux valeurs faibles d'IPR alors qu'elles sont potentiellement dangereuses. Par exemple, le scénario (gravité très élevée, fréquence faible, difficulté de détection très faible) avec IPR de  $9 \times 3 \times 2 = 54$  est jugé non-critique face au scénario (gravité modérée, fréquence modérée, difficulté de détection élevée) avec IPR de  $4 \times 5 \times 6 = 120$  même si elle doit avoir une priorité plus élevée pour des actions correctives.

Basé sur ces constats, la criticité des paramètres ou des caractéristiques est alors proposée d'être jugée en fonction du risque associé à deux facteurs séparément, premièrement pour éviter les priorités identiques malgré

les niveaux différents de risque et surtout parce que chaque facteur de risque déclenche une décision différente. Le niveau élevé du risque de chaque facteur est déterminant :

- Difficulté de réalisation ; anticipe les activités de surveillance de processus
- Gravité ; anticipe les activités de contrôle de conformité des produits

- La structure et la décomposition d'AMDEC :

Comme décrit précédemment, par une grille d'AMDEC nous mettons en avant les effets et les causes d'une défaillance. Cela s'inspire d'une perspective correctrice et donc d'un point de vue pessimiste. Cependant la planification d'inspection nous amène plutôt à parler de « Pourquoi », et de « Comment ». Pour une caractéristique nous nous posons des questions suivantes : pourquoi est-il important d'assurer la qualité, ou de respecter les exigences par l'inspection ? Quelles sont les fonctions du produit à respecter ? Comment peut-on assurer le respect des exigences pour une caractéristique donnée ? Quelles sont les caractéristiques de plus bas niveau qui contribuent à la satisfaction de caractéristiques ? ... En outre le « Comment », se décompose en deux niveaux : Description de la fonction/opération et les critères d'acceptation quantitatifs associés à celles-ci. La nouvelle structure détaillée précédemment, fait en sorte que ces questions puissent être traitées.

- La prise de décision :

Les décisions doivent être prises à l'aide d'heuristiques qui permettent d'interpréter la pertinence des facteurs dans leurs ensembles. De point de vue de la planification d'inspections, les heuristiques se fondent sur deux stratégies différentes et nous conduisent à :

- Contrôler les fonctions de haut niveau lorsque la gravité est associée à un niveau de risque élevé et la difficulté de réalisation ne semble pas être cruciale.
- Contrôler/surveiller les caractéristiques des pièces du bas niveau/des paramètres du procédé et leurs dispersions lorsque la difficulté de réalisation représente un risque élevé.

Mis à part ces cinq adaptations majeures nécessaires, il est à noter que contrairement à l'usage commun l'AMDEC au cours de la production, qui est de mettre en œuvre les actions correctives dû à l'apparition de non-fonctionnalités, la planification d'inspection tend à éviter cette dernière, en élaborant un plan optimal de contrôle de conformité/suivi de fabrication lors des étapes de la conception.

- Analyse des risques :

Les causes potentielles d'une non-fonctionnalité éventuelle, associées à leur importance doivent être déterminées.

- Propagation des risques :

L'imprécision des informations fournies par les experts doivent être prise en compte pour la prise de décision finale. Pour répondre à cela, les niveaux des facteurs de risque sont estimés une seule fois à un seul niveau et se

propagent ensuite à d'autres niveaux. D'un point de vue global (multi-niveaux) les facteurs de risque restent cohérents et l'imprécision est impliquée qu'une seule fois dans toute la démarche. Cela n'est possible que via la prise en compte des relations causales

L'objectif est d'obtenir une hiérarchisation robuste des risques malgré l'incertitude épistémique, qui est due à un manque de connaissances du système. Elle peut être réduite en faisant d'avantage d'efforts par des recueils de données, consultation d'experts, ... (Sallak et al. 2013). L'analyse de sensibilité atteste que l'information imprécise, mais cohérente est préférable que l'information subjective. Par ailleurs une identification peu fiable des KCs aboutie au bout du compte à un plan d'inspection non-efficace.

## 5 CONCLUSION

Comme il a été abordé, l'AMDEC classique offre une structure dont l'approche d'analyse est dite, « Bottom-Up » au sein d'un même tableau. Il débute avec les modes de défaillance potentiels connues à un certain niveau et examine l'effet sur le niveau supérieur (Sharma et al. 2005). Par conséquent, une analyse complète d'AMDEC d'un système, couvre souvent tous les niveaux de la hiérarchie du processus au produit.

Cependant d'un point de vue inspection, nous avons proposé une approche qui est pour un système dans son ensemble, « Top-Down » puisque l'intention finale se caractérise par la garantie de la qualité finale.

L'identification des KCs se fait par la suite étant donnés les facteurs de risque estimés à trois niveaux d'ACDE. L'utilisation des liens de causalité pour la propagation de ces facteurs de risque permet d'éviter la ré-estimation de ceux-ci et de maintenir une certaine cohérence des données de la prise de décision.

En perspective, la prise de décision doit se faire en fonction de criticité des deux facteurs simultanément. La gravité à elle seul inspire le contrôle de conformité et la difficulté de réalisation dicte plutôt les activités de suivi de fabrication, tandis qu'un regard sur les deux nous oriente vers une co-conception de ces deux facettes d'un plan d'inspection.

Les décisions prises à chaque niveau, ne sont pas sans influence sur d'autres niveaux. Le contrôle de conformité du produit peut dispenser le suivi du processus de fabrication et vice versa. Ces influences peuvent être suivies grâce à la prise en compte des liens de causalités. La prise de décision n'est donc pas locale, comme le cas d'AMDEC classique.

## REFERENCES

Bassetto, S., 2005. *Contribution à la qualification et amélioration des moyens de production. Application à une usine de recherche et production de semi-conducteurs*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Chang, K.-H., Cheng, C.-H. & Chang, Y.-C., 2009. Reprioritization of failures in a silane supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique. *Soft Computing*, 14(3), pp.285–298.

Etienne, A., 2007. *Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques*. Thèse de doctorat à l'Université Paul Verlaine - Metz.

Everhart, J.L., 1960. *Handbook of parts, forms, processes and materials in design engineering*, New York: Van-Nostrand-Reinhold.

El Gueder, J., 2012. *Modèle et logiciel KBE pour l'intégration du chainage des opérations de fabrication en conception de produit*. Thèse de doctorat à l'Université de Technologie de Troyes.

Hassan, A., 2010. *Proposition et développement d'une approche pour la maîtrise conjointe qualité/coût lors de la conception et de l'industrialisation du produit*. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Metz.

Matousek, R., 1957. *Engineering Design: A Systematic Approach*, London, UK: Lackie & Son Ltd.

Mili, A. et al., 2009. Dynamic risk management unveils productivity improvements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1), pp.25–34.

Ozouf, V., 2009. *Concevoir et produire "sûr de fonctionnement": comment conserver un niveau de risques acceptable dans un contexte de conception/industrialisation de plus en plus rapide d'un produit de plus en plus complexe*. Chambéry.

Sallak, M., Aguirre, F. & Schon, W., 2013. Incertitudes aléatoires et épistémiques, comment les distinguer et les manipuler dans les études de fiabilité? In *QUALITA2013*. Compiègne: France.

Sankar, N.R. & Prabhu, B.S., 2001. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 18(3), pp.324–336.

Seyed-Hosseini, S.M., Safaei, N. & Asgharpour, M.J., 2006. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(8), pp.872–881.

Sharma, R.K., Kumar, D. & Kumar, P., 2005. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(9), pp.986–1004.